

Expérience de recherche d'ondes gravitationnelles : VIRGO

Participation du LAPP

Expérimentateurs : D. Buskalic, R. Flaminio, A. Kaczmarek, F. Marion, L. Massonnet (éméritat), R. Morand, **B. Mours**, J. Ramonet, E. Tournefier, D. Verkindt, O. Véziant, M. Yvert

Equipe technique : F. Bellachia, D. Boget, F. Chollet, P-Y. David, D. Dufournaud, L. Fournier, G. Gaillard, L. Giacobone, C. Girard, R. Hermel, J-C. Lacotte, J-C. Le Marec, B. Lieunard, S. Malosse, A. Masserot, F. Moreau, P. Mugnier, R. Sottile, S. Vilalte

Stagiaires : D. Conseil, L. Girard, R. Rizenthaler

Collaboration

Collaboration Franco-Italienne regroupant 11 Instituts dont 5 Laboratoires Français : LAPP Annecy, IPN Lyon, OCA Nice, LAL Orsay, ESPCI Paris.

Dates clés

1989 : Proposition de réaliser VIRGO

1993 : Accord CNRS/INFN

1996 : Ouverture du chantier à Cascina

2000 : Fin d'installation de l'interféromètre central

2001 : Premières interférences avec l'interféromètre central

2002 : Fin d'installation de VIRGO

Abstract

A large interferometer dedicated to the search of gravitational waves is being built in Italy, near Pisa. The LAPP team is in charge of the mirror vacuum tanks, the detection system, the data acquisition, and is involved in the experiment commissioning and in the data analysis.



Figure 1 : Vue aérienne de l'expérience VIRGO (Octobre 2001)

L'expérience VIRGO

L'objectif de l'expérience est de mettre en évidence - de façon directe - l'existence des ondes gravitationnelles, prédite il y a plus de 80 ans par Einstein comme une conséquence de la théorie de la relativité générale. L'intérêt d'une telle mise en évidence est multiple : non seulement elle conforterait davantage la théorie de la relativité générale mais ce serait le premier élément d'analyse des propriétés de la particule d'échange de la force gravitationnelle, le graviton. De plus, elle ouvrirait une nouvelle voie d'exploration de l'univers; les

astrophysiciens attendent en effet des ondes gravitationnelles des informations sur des régions cosmiques très denses et très éloignées.

Des ondes gravitationnelles sont émises lorsque des masses sont accélérées d'une façon non symétrique. Ces ondes induisent une «déformation de l'espace» conduisant à une modification Δl de la distance l entre deux points. La perturbation de la métrique $h = (2 \Delta l)/l$ et l'énergie rayonnée correspondante sont non négligeables lorsque masses et accélérations mises en jeu sont très grandes. Avec les technologies actuelles on ne peut pas espérer engendrer en

laboratoire des ondes gravitationnelles conduisant à des effets mesurables. En fait les espoirs sont tournés vers trois types de sources astrophysiques :

- l'explosion d'une supernova ou la création d'un trou noir, phénomènes brefs (quelques millisecondes) pour lesquels h est évalué à environ 10^{-23} pour une supernova explosant à une distance de 10 Mpc (amas de galaxies de la Vierge).
- les sources périodiques, formées par la rotation asymétrique d'un objet massif et compact tel qu'une étoile à neutrons. Le signal correspondant est très petit (h est inférieur à 10^{-24} pour le pulsar du Crabe par exemple) mais présente l'avantage d'être toujours présent.
- la coalescence d'un système binaire d'étoiles à neutrons ou de trous noirs. Ce phénomène est la source la plus prometteuse d'ondes gravitationnelles car il présente un signal très caractéristique. Le taux attendu est de quelques événements par an dans un rayon de 100 Mpc.

La mesure d'un changement relatif de distance inférieur à 10^{-21} entre deux points est une expérience délicate envisagée depuis de nombreuses années. L'idée de base du détecteur VIRGO consiste à prendre comme distances de référence les longueurs des bras d'un interféromètre de Michelson. Les élongations asymétriques induites par une onde gravitationnelle dans deux directions X et Y sont alors mesurées comme une variation de phase entre les faisceaux lumineux se propageant dans les deux bras.

La sensibilité de l'expérience sera de $h \sim 3 \cdot 10^{-23} / \text{Hz}^{-1/2}$ au-dessus d'une centaine de hertz ; elle est alors limitée par le bruit de photons du faisceau laser. Elle sera atteinte en insérant dans chacun des bras longs de 3 km une cavité Fabry-Perot de finesse 50 pour porter la longueur effective des bras à une centaine de kilomètres, et en utilisant la technique du recyclage pour obtenir une puissance lumineuse sur la lame séparatrice de l'interféromètre d'environ 1 kW. A plus basse fréquence la sensibilité est limitée par l'agitation sismique et thermique des miroirs.

Cet interféromètre est découplé du bruit environnant en étant suspendu dans l'ultra vide : la suspension de ses composants les découple du bruit sismique, l'ultra vide les isole du bruit acoustique et supprime les perturbations dans la propagation du faisceau lumineux. Des suspensions de plusieurs étages sont installées dans des tours dont la hauteur dépend de la qualité de l'isolation sismique requise. Le composant optique qui représente la charge utile de la suspension est suspendu dans la partie basse de ces tours. Ces bas de tours raccordent les segments constitutifs de l'interféromètre.

La fin de la construction sur le site de Cascina, au voisinage de Pise, et le démarrage de la prise de données sont prévus pour la fin de l'année 2002. L'année 2001 a représenté une étape importante dans le processus de mise au point du détecteur : elle correspond à l'achèvement d'une première phase de construction permettant d'entreprendre le test de la partie centrale l'interféromètre, dans une configuration simplifiée par rapport au dispositif final.

Contribution du LAPP

Les responsabilités du LAPP dans la réalisation de l'appareillage concernent les domaines suivants :

- l'étude et la réalisation des enceintes à vide du bâtiment central et des tours d'extrémité,
- l'étude et la réalisation de l'ensemble de détection du signal,
- les stations de travail, le système d'horloges, les cartes de transmissions numériques, l'imagerie,
- le système d'acquisition de données,
- la calibration de l'interféromètre,
- certains logiciels de l'expérience (simulation, visualisation de données...),
- une contribution au fonctionnement de l'interféromètre et à l'analyse des données.

Activités 2000/2001

Enceintes à vide

Les enceintes à vide qui abritent les composants optiques et leurs systèmes de suspension ont été installées en 1999 pour la partie centrale de l'interféromètre. Depuis lors, les activités principales du groupe du LAPP ont été l'amélioration du système d'étuvage des enceintes à vides ainsi que la préparation de l'installation des enceintes des extrémités de l'interféromètre et de tous les éléments associés («bas de tour», tubes de liaison, hublots, système d'étuvage, chambres intermédiaires séparant les parties hautes et basses des tours, viroles).

L'ensemble de détection

L'ensemble de détection doit pouvoir fonctionner avec une excellente efficacité quantique, une puissance lumineuse de l'ordre du watt, et un bruit électronique inférieur au bruit de photon. Il comprend une partie optique importante. Après l'avoir réalisé et installé sur le site à la fin de l'été 1999, l'accent a été mis sur sa mise au point et son fonctionnement pendant les années 2000-2001. Les réalisations principales de ces deux années ont été :

- L'élaboration de procédures de réglage et de logiciels de monitoring du banc.
- La mise en place complète du système de détection aboutissant à sa mise en œuvre pendant la première période de fonctionnement de l'interféromètre central (3 jours en septembre 2001) pendant laquelle l'interféromètre ainsi que la cavité «mode cleaner» de sortie sont restés asservis pendant la très grande majorité du temps, dont une période continue de 51 heures.
- L'assistance sur le site pour le fonctionnement du système de détection.
- L'étude du passage de la configuration actuelle (interféromètre central) à la configuration finale (bras de 3km) et l'amélioration de l'électronique analogique des photodiodes.

Composants «standards»

Pour le fonctionnement de l'expérience, un certain nombre de composants «standards» sont fournis par le LAPP : châssis VME, processeurs VME, cartes VME de liaison numérique par fibres optiques, système de distribution de signaux d'horloge, caméras numériques permettant de visualiser et d'analyser les faisceaux ainsi que de déterminer la position des miroirs, système de vidéo analogique, moyens de calculs du site. Pendant la période 2000/2001, ces composants standards ont nécessité un travail de maintenance, ainsi que d'amélioration des différents logiciels associés.

L'acquisition des données

L'acquisition des données doit fonctionner en mode continu en collectant une grande quantité d'informations (plusieurs MBytes/sec) sur plusieurs sites distants (3 km). Les réalisations principales ont été pour ce sujet :

- La mise en œuvre du système d'acquisition de données sur le site qui fonctionne de manière continue depuis le printemps 2001.
- L'apport de nouvelles fonctionnalités telles que la fabrication de «trend data».
- L'assistance sur le site pour le fonctionnement du système d'acquisition des données.
- Le suivi du format de données développé au LAPP qui a été adopté par tous les grands projets de détecteurs d'ondes gravitationnelles (GEO, LIGO, TAMA, VIRGO).
- Le développement du système de sélection en ligne avec la mise au point d'algorithmes de sélection de bruits impulsifs.
- L'amélioration de l'outil de visualisation des données.

L'étalonnage de l'interféromètre

Les préparatifs pour la calibration de VIRGO ont été centrés sur l'étude d'outils logiciels pour corriger les effets instrumentaux et «reconstruire» la valeur de h . Certains de ces

outils ont été mis en œuvre pendant la première prise de données techniques et ont permis de déterminer la courbe de sensibilité de l'interféromètre (voir Figure 2). Un actionneur optique utilisant la pression de radiation d'un laser a été étudié et sa réalisation a commencé.

La préparation de l'analyse des données

De multiples outils logiciels ont été développés pour préparer l'analyse des données :

- Le développement d'un environnement d'analyse interactif (Vega) a été poursuivi.
- Un soutien a été apporté à la maintenance du logiciel de simulation de l'expérience et le développement de nouvelles fonctionnalités.
- La recherche de coalescences binaires a fait l'objet de plusieurs développements : mise au point d'un algorithme simple, étude des moyens de calcul nécessaires, étude d'une méthode basée sur une analyse par bandes de fréquence, recherche de méthodes de placement des «templates».
- L'étude de moyens de recherche de signaux provenant de pulsars faisant partis d'un système binaire a été entrepris.

La mise au point du détecteur

Un interféromètre est un ensemble complexe qui pour être opérationnel nécessite le fonctionnement simultané de nombreux éléments mécaniques, optiques, électroniques et informatiques. Cette activité a nécessité la présence sur le site de plusieurs membres de l'équipe du LAPP. Sa coordination a été assurée par un physicien du LAPP. Débutée au début de l'année 2001 par la mise en place d'un laser auxiliaire, elle a permis d'asservir l'interféromètre sur la frange noire pour la première fois en juin 2001 et d'effectuer la première prise de données techniques en septembre 2001. Le groupe du LAPP s'est naturellement impliqué dans l'analyse de ces données.

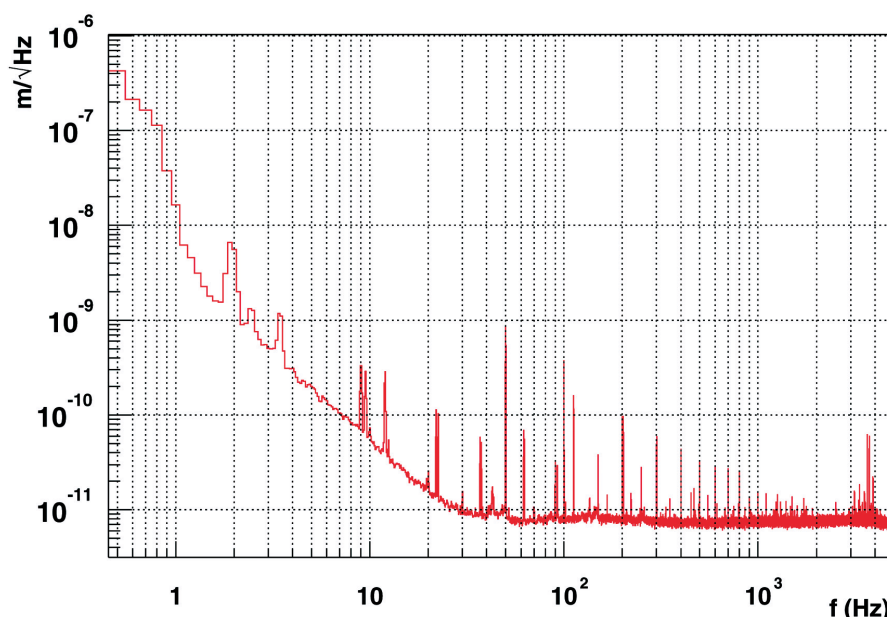


Figure 2 : Courbe de sensibilité de l'interféromètre central obtenue lors de la première prise de données techniques (Septembre 2001)